

В.О. Борусевич, А.Ю. Яковлев**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ
ДВИЖИТЕЛЕЙ МОРСКИХ РОБОТОВ**

Движители являются неотъемлемым элементом морских роботов (МР), а их характеристики в значительной степени определяют алгоритмы управления МР. С этой точки зрения важно правильно выбирать тип движителей, оптимизировать их в комплексе для достижения наилучших характеристик и учитывать специфические закономерности работы движителей. В работе анализируются особенности движителей морских роботов (ДМР), оценивается актуальность их использования для различных задач. В работе рассмотрены движители с открытыми гребными винтами (ГВ), ГВ в насадке, ГВ в трубе. Приведен анализ эффективности этих движителей на различных режимах работы, в том числе в условиях скоса потока. Показано, что современные методы проектирования и оптимизации движителей позволяют существенно улучшить их характеристики, по сравнению с используемыми на МР в настоящее время. В частности, использование оптимизированных типов движителей позволит повысить их тягу на швартовном режиме в 1,5 раза. Дополнительное увеличение тяги и КПД движителей возможно за счет энергосберегающих устройств. В работе сопоставлены несколько типов подобных устройств на примере ГВ в трубе. Приведены примеры движителей с дополнительными неподвижными лопастными системами, соосными ГВ и движителя с концевым приводом ГВ (RIM-драйвер). В частности показано, что применение RIM-драйвера в рассмотренном примере привело к увеличению тяги на 17%. Отдельно рассмотрены вопросы взаимодействия движителя с двигателем и шумности движителей. Взаимодействие движителя с двигателем рассмотрено для двух вариантов работы двигателя: при сохранении неизменной мощности или постоянного момента на валу при изменении оборотов двигателя. Показано, что отклонение режима работы движителя от проектного может приводить к рассогласованию работы двигателя и движителя, что чревато существенными потерями тяги. По результатам исследования делаются выводы: о необходимости проектирования движителей МР с использованием современных методик и целесообразности разработки типорядов движителей различной мощности для применения на МР.

Движители; морские роботы; проектирование; оптимизация; гребные винты; гребные винты в насадке; rim-движитель; энергосберегающие устройства; двигатель.

V.O. Borusevich, A.Yu. Yakovlev**PROPULSORS OF MARINE ROBOTS: FEATURES OF DESIGN
AND OPERATION CONTROL**

Propulsors are an integral part of marine robots (MR), and their characteristics determine control algorithms of MR. The paper analyzes the features of marine robot propulsors, assesses the relevance of their use for various tasks. The propulsors with open and ducted propellers and bow thruster were investigated. The analysis of propulsors efficiency has been presented in the paper at different operating modes, including in the flow inclination. It has been showed that modern methods of propulsor design and optimization allow to greatly improve the propulsor in comparison with the ordinary propulsors of MR. For example application of optimized propulsors may get 1.5 times higher thrust on the bollard pool mode. Additional increasing of thrust and efficiency may be realized by means of energy saving devices. A few types of energy saving devices for the bow thruster have been matched. There presented stator blades rows, coaxial propellers and rim driver. For instance an application of rim driver leads to the thrust increase of about 17% in the case study. The issues of engine and propulsor interaction and noise of propulsors have been investigated separately. The propulsor – engine interaction has been investigated for two modes of engine performance: in case of a constant capacity or a constant torque on the shaft when

changed is the number of revolutions. It has been demonstrated the deviation of propulsor mode from the planned one may lead to mismatch of propulsor and engine. It may results in serious thrust reduction. It is concluded that it is necessary to design propulsors of MR by modern methodology and advisable to develop the collection of propellers with different power for use on MR.

Propulsors; marine robots; design; optimization; marine propellers; ducted propellers; rim driver; energy saving devices; engine.

Введение. Двигательные комплексы являются одним из важнейших устройств на борту МР, обеспечивающим его перемещение и точное позиционирование. Кроме того, двигатели являются одним из основных потребителей энергии на борту МР. Следовательно, управление МР в значительной степени определяется управлением работой двигателей. В свою очередь работа двигателя обеспечивается его целенаправленным проектированием. Основные принципы проектирования двигателей МР изложены в классических книгах, посвященных проектированию подводных аппаратов (ПА) и МР [1, 2]. Однако эти подходы опираются на морально устаревшие технологии. Кроме того, в настоящее время используются новые типы двигателей, которые не могут быть спроектированы по указанным методам.

С целью лучшего понимания сложившейся ситуации, специалистами Крыловского ГНЦ был проведен анализ публикаций по вопросам разработки двигателей для ПА и МР [3]. В этой работе было показано, что современные разработки двигателей МР отличаются крайней неоднородностью характеристик, когда у одних и тех же разработчиков встречаются достаточно хорошие устройства и одновременно создаются крайне малоэффективные образцы. В работе [3] так же было продемонстрировано существенное преимущество (по одному из ключевых параметров) современных разработок судовых двигателей над двигателями, применяемыми для МР. Наконец, в работе [4] был проведен анализ направлений совершенствования современных двигателей МР и определены типы двигателей и области их наиболее эффективного применения.

1. Проектирование двигателей морских роботов. Проектирование двигателей традиционно включает следующие этапы: выбор режима работы двигателя, выбор типа и основных параметров двигателя, собственно проектирование и оптимизация элементов двигателя. Таким образом, особенности режима работы сказываются принципиальным образом на выборе типа и параметров двигателя, а все вышеуказанные факторы приводят к различной геометрии элементов двигателя. Поэтому в первую очередь необходимо определить специфику применения двигателей на МР.

1.1. Типы двигателей МР. Двигательный комплекс МР обычно состоит из ходовых двигателей, обеспечивающих поступательное движение МР, и маневренных двигателей, обеспечивающих маневрирование МР в горизонтальной плоскости и по глубине [1].

К типам двигателей, применяемых на МР традиционно относят гребные винты в направляющих насадках, гребные винты и водометы [1, 2]. В ряде случаев могут применяться и более экзотические типы двигателей. В частности в последние годы на МР активно внедряются кольцевые электродвигатели-двигатели (RIM-драйверы) [5].

С точки зрения разработчиков двигателей, наиболее принципиальным моментом при выборе его типа является нагрузка. Двигатели, работающие при малых скоростях движения, обычно относятся к тяжело нагруженным, в случае обеспечения большой скорости перемещения МР должны применяться легко или умеренно нагруженные двигатели. Наиболее эффективным типом тяжело нагруженных двигателей традиционно считается ГВ в пропульсивной насадке. Именно ГВ

в насадке являются основным типом движителя для буксиров и судов рыбопромыслового флота. Также в условиях больших нагрузок, аналогичным подруливающим устройствам судов работают водометы типа ГВ в трубе. Что касается легко и умеренно нагруженных движителей, то здесь выбор шире – это и обычные ГВ и водометные движители различных типов. Причем в качестве мало- и умеренно-нагруженных движителей могут применяться и движители в насадке специальной формы (отличной от указанной выше пропульсивной насадки, применяемой для режимов больших нагрузок).

Помимо нагрузки для выбора типа движителя и его проектирования важным является расположение привода ГВ: находится привод внутри корпуса МР или он вынесен в поток и составляет часть движителя. Требование эффективности использования движителя для маневрирования МР также влияет на выбор его типа. Причем здесь важно знать в каком диапазоне режимов и углов перекадки будет работать движитель.

Одним из способов повышения характеристик движителей является применение энергосберегающих устройств. К их числу относятся неподвижные лопастные системы, располагаемые как перед, так и за ГВ. Использование RIM-драйверов в свою очередь позволяет более эффективно использовать лопасти ГВ и за счет этого также добиться улучшения характеристик движителя.

1.2. Основные характеристики МР и требования, предъявляемые к ним. Традиционно разработчики МР ожидают от движителя высокий КПД, надежность работы, возможность плавного регулирования частоты вращения, быстрого реверса и малую шумность [1]. Надо сказать, что ряд из указанных качеств является взаимоисключающими. Так достижение высокого КПД без оглядки на другие качества приведет к опасности возникновения кавитации лопастей движителя и повышению шумности. Снижение шумности и вибраций движителя неизбежно ведет к снижению его КПД, но при умелом проектировании потери КПД будут минимальны.

При дальнейшем анализе будем пользоваться следующими характеристиками движителей, позволяющими проводить их сопоставление между собой по наиболее значимым качествам.

Наиболее значимыми на практике являются упор T и момент Q на движителе. Следует иметь в виду, что упор движителя может отличаться от упора входящего в его состав ГВ как в большую, так и в меньшую сторону. Вместо размерных величин упора и момента обычно используются безразмерные характеристики – коэффициенты упора K_T и момента K_Q , и представляют их в зависимости от его поступи J

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4},$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5},$$
(1)

где ρ – плотность воды, n – число оборотов гребного винта, D – характерный диаметр движителя (обычно в его качестве выступает диаметр ГВ).

$$J = \frac{V}{nD},$$
(2)

где V – скорость перемещения МР.

Момент на движителе непосредственно связан с подводимой к нему мощностью N , которая также является важнейшей характеристикой движителя:

$$N = 2\pi nQ.$$
(3)

Опираясь на представление мощности (3), получают КПД движителя [6]

$$\eta = \frac{J K_T}{2\pi K_Q} . \quad (4)$$

Для характеристики эффективности движителей, работающих с большой нагрузкой (в первую очередь на швартовном режиме), используют так называемый коэффициент Бендемана.

$$K_{ben} = \frac{K_{T0}}{(K_{Q0})^{2/3}} , \quad (5)$$

где K_{T0} и K_{Q0} обозначают коэффициенты упора и момента движителя на швартовном режиме (при $J=0$).

Введение этого коэффициента обусловлено тем, что при увеличении нагрузки КПД движителя стремится к нулю и не позволяет характеризовать его качество.

1.3. Выбор типа движителя. Задача проектирования движителей включает в себя анализ целого ряда характеристик, а ключевым моментом является определение геометрии лопастей. Причем собственно определение геометрии лопастей может осуществляться различным образом: по диаграммам испытаний серий ГВ, с помощью методов проекторочного расчета или путем прямой численной оптимизации. Прямая численная оптимизация представляет собой наиболее современный подход и позволяет учитывать различные факторы и их комбинации [7]. Говоря о движителе МР, недостаточно рассматривать ГВ сам по себе (так называемый ГВ «в свободной воде»). Движители МР обычно включают в себя электродвигатель, располагаемый в гондоле.

Ранее в работе [4] были спроектированы и сопоставлены движители МР различных типов, при этом был выполнен комплекс расчетных исследований, включающий: проектирование ГВ на основе серийных данных модельных испытаний, расчет работы ГВ в составе движителя и определение характеристик движителя на различных режимах работы. Для проектирования ГВ использовалось приложение, разработанное Г.И. Каневским. Для оценки характеристик движителя и ГВ в его составе использовался метод расчета характеристик винторулевых колонок [8]. Правомерность применения данного подхода обоснована конструктивным сходством движителя МР и современной винторулевой колонки с электродвигателем. Проектирование движителей осуществлялось для двух скоростных режимов, отвечающих характеристикам двух условных МР (см. табл. 1). При этом учитывалось наличие попутного потока в диске движителя, а коэффициент засасывания считался пренебрежимо малым.

В частности, были рассмотрены следующие типы движителей. Открытый ГВ – который остается, по настоящее время, наиболее широко используемым типом движителя (рис. 1). Применение насадок и различных устройств сохранения энергии позволяет расширить диапазон эффективной работы движителя на базе ГВ. Но в области умеренных нагрузок правильно спроектированный ГВ позволяет достигать КПД порядка 75 % и практически не имеет конкурентов.

ГВ в насадке, которые обычно рассматривают как отдельный тип движителя. Традиционный вариант ГВ в насадке наиболее эффективен на режимах с большой нагрузкой (рис. 2). В этих случаях насадка, представляющая собой кольцевое крыло специальной формы, обтекается потоком под углом атаки и на ней возникает значительная сила, продольная составляющая которой создает дополнительный упор движителя [6]. В частности, на швартовном режиме (при нулевой скорости движения), насадка может давать до половины (и иногда даже более) тяги движителя. ГВ в насадке может быть спроектирован для работы на малых нагрузках в этом случае, если его внешний вид становится существенно иным (рис. 3), причем насадка в этом случае обычно не создает упора, но формирует поток, натекающий на лопасти ГВ.

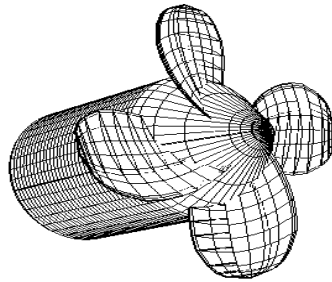


Рис. 1. Двигатель МР с открытым ГВ

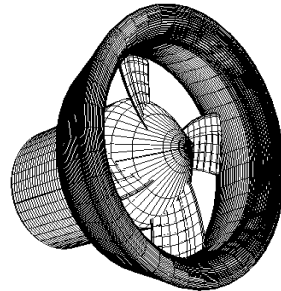


Рис. 2. Тяжелонагруженный двигатель в насадке

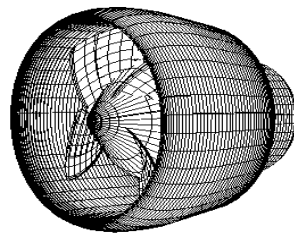


Рис. 3. Умеренно/легконагруженный двигатель в насадке

Помимо двигателей, реализуемых в виде отдельных внешних модулей, которые были рассмотрены выше, для МР применяются двигатели типа ГВ в трубе [9]. По принципу действия данный тип двигателей близок к подруливающим устройствам и водометным двигателям судов. Проектирование подобных двигателей представляет отдельную задачу, для решения которой разработаны специальные методы [10, 11].

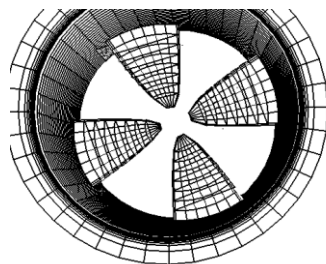


Рис. 4. Двигатель типа ГВ в трубе. Вариант RIM-драйвер

Одним из ключевых направлений повышения эффективности современных двигателей является использование энергосберегающих устройств. Наиболее простым с технической точки зрения устройством сохранения энергии является установка неподвижных лопастных систем перед или за ГВ. Согласно многочисленным исследованиям, лопастная система, располагаемая за ГВ, дает лучший эффект из всех возможных вариантов [12], поэтому именно такой двигатель в трубе и был спроектирован. Эффект в данном случае достигается за счет утилизации неподвижной лопастной системой энергии, которую ГВ затратил на закрутку потока. Как видно из рис. 5, прирост упора двигателя за счет установки, раскручивающей поток лопастной системы, составил порядка 15 %.

Другим способом сбережения энергии, затраченной на вращение ГВ, является использование соосных ГВ. Как показали расчеты, для данного двигателя применение соосных ГВ дает эффект, сопоставимый с установкой раскручивающей лопастной системы (рис. 5). Однако следует признать, что этот вариант сложнее реализуем с технической точки зрения.

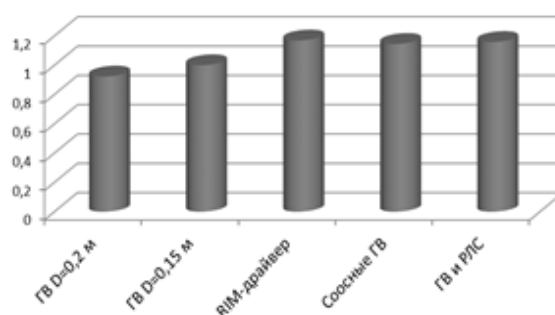


Рис. 5. Относительный прирост упора, создаваемого двигателем типа ГВ в трубе, при использовании различных устройств и способов энергосбережения

Использование двигателей с концевым приводом, так называемых RIM-драйверов, является одним из инновационных направлений и находит применение для МР [5]. Наибольшие сложности при разработке RIM-драйверов связаны с созданием самого концевого привода и системы управления им. С точки зрения гидродинамики лопастная система RIM-драйвера имеет ряд преимуществ. В частности: лопастям RIM-драйвера можно придать специальную форму (рис. 4), которая, по сравнению с обычным ГВ, позволяют в большей степени нагрузить концевые сечения и использовать более эффективные профили цилиндрических сечений лопастей [13]. В результате проектирования двигателя ГВ в трубе в варианте RIM-драйвера в данном примере было получено увеличение тяги двигателя на 17 %. При этом следует иметь в виду, что КПД этого двигателя тем не менее уступает КПД ГВ в насадке, а технические сложности при его реализации требуют отдельного рассмотрения. Однако КПД RIM-двигателя может быть улучшен за счет применения дополнительных энергосберегающих устройств, например раскручивающей лопастной системы [14].

1.4. Результаты проектирования двигателей. На основании приведенных в работе [4] и на рис. 6, 7 данных можно констатировать, что тяжело нагруженные двигатели с открытым ГВ существенно уступают в КПД легконагруженным двигателям, но превосходят их по тяговым характеристикам на режимах с большой нагрузкой. При этом применение двигателя с насадкой существенно улучшает его характеристики при тяжелой нагрузке. В то же время применение комплексных современных решений, включающих специально профилированную насадку –

систему энергосберегающих устройств и оптимальную лопастную систему, – всегда обеспечивает наилучшие характеристики. При этом можно оптимизировать движитель как на работу на одном наиболее важном режиме, так и улучшать его характеристики в некотором диапазоне режимов работы.

В качестве наглядной иллюстрации на рис. 6 представлены полученные зависимости коэффициента Бендемана от мощности движителя для спроектированных движителей. На этом же рисунке нанесены известные из литературы характеристики движителей реальных ПА. Видно, что на ПА далеко не всегда используются движители с удовлетворительными характеристиками, а рассматриваемые типоряды движителей [4] отличаются стабильностью характеристик.

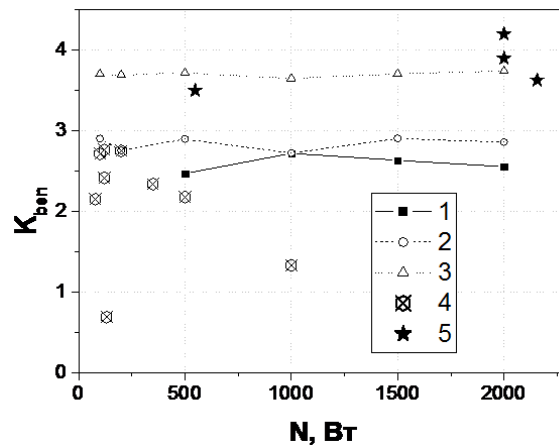


Рис. 6. Зависимость коэффициента Бендемана от мощности и типа движителя: 1 – легконагруженный ДМР с открытым ГВ; 2 – тяжелонагруженный ДМР с открытым ГВ; 3 – тяжелонагруженный ДМР с ГВ в насадке; 4 – движители реальных ПА; 5 – движители в насадке (эксперимент)

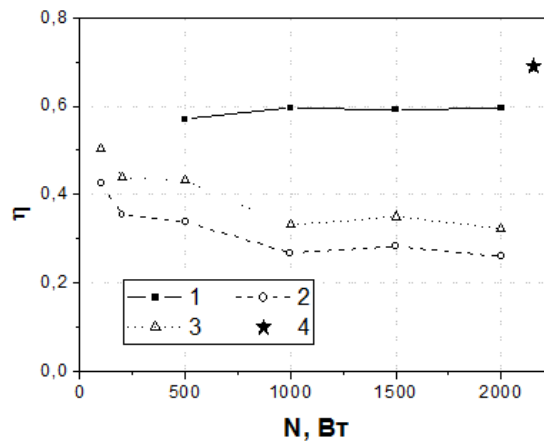


Рис. 7. Зависимость КПД на рабочем режиме от мощности и типа движителя: 1 – легконагруженный ДМР с открытым ГВ; 2 – тяжелонагруженный ДМР с открытым ГВ; 3 – тяжелонагруженный ДМР с ГВ в насадке; 4 – движители в насадке (эксперимент)

1.5. Нестационарные характеристики и шум движителей. Как было отмечено выше, шумоизлучение движителей представляет собой одну из проблем разработки движителей для МР. С излучением шума тесно связана проблема возбуждения нестационарных сил на движителях. Нестационарные силы, возникающие на движителе, имеют различную природу: неоднородность потока в диске ГВ вызывает появление пульсаций сил на дискретных частотах, кратных лопастью, нестационарный характер течения, связанный с турбулентностью, приводит к широкополосным пульсациям сил на движителе [15]. Эти нестационарные силы приводят к шумоизлучению движителя на дискретных частотах и в широкополосном спектре [16]. С учетом относительно больших скоростей вращения ГВ МР, указанный шум будет иметь место в звуковом диапазоне частот. Кроме того, шумоизлучение движителя включает кромошный шум, шум, обусловленный кавитацией, шум турбулентной струи, которые проявляются на более высоких частотах.

Современные численные и экспериментальные методы позволяют успешно прогнозировать шумоизлучение движителей [17] и проводить их акустическую оптимизацию [18]. Эти методы могут быть применены и для разработки малошумных движителей МР.

2. Учет особенностей работы движителя в составе МР. Движители МР в большинстве случаев рассматриваются в качестве основных средств управления при выполнении маневрирования и позиционирования МР. Причем управление должно осуществляться в пространстве (в горизонтальной и вертикальной плоскостях) и осуществляться с высокой точностью.

Таким образом, работа движителей МР отличается от большинства судовых движителей наличием широкого диапазона режимов работы, характеристики движителя как средства активного управления зависят от согласованности движителя с двигателем, а управление этой системой требует эффективной обратной связи. С подобными проблемами в судостроении столкнулись относительно недавно – при разработке современных электрических колонок [19]. Эти наработки могут быть использованы при создании движителей МР. Далее представлены оценки работы движителя МР при маневрировании. В качестве примера выбран ДМРЛ с открытым ГВ $D=0,2$ м, мощностью 500 Вт.

2.1. Определение характеристик движителей при углах скоса потока. Причины, вызывающие работу движителя МР в скошенном потоке, могут быть различными: собственно перекладка движителя как средства управления, движение МР лагом или с изменением глубины, наличие неоднородности потока вследствие влияния конструктивных элементов МР. Однако с точки зрения работы движителя важна не столько причина появления скоса потока, сколько наличие скоса как такового. Следует отметить, что причины, вызвавшие скос потока, могут иметь значение при определении нестационарных характеристик и шума движителя, что требует специального исследования. Специалисты в области ПА отмечают, что оценка характеристик движителя в скошенном потоке является сложной задачей [20]. Это действительно так, в особенности если речь идет о больших углах скоса, когда начинают происходить отрывные и кавитационные процессы на элементах движителя. Тем не менее эти вопросы интенсивно изучались в последние годы применительно к электрическим винторулевым колонкам. Исследования включали модельные испытания на специальном оборудовании в кавитационных трубах и опытовых бассейнах Крыловского ГИЦ [21], разработку специализированных методов расчета [8] и приведение расчетов в стандартных пакетах CFD.

На рис. 8, 9 представлено сопоставление результатов расчета по методу [8] характеристик ГВ в скошенном потоке с экспериментальными данными. На рис. 10 приведено аналогичное сопоставление для модели движителя типа винторулевой колонки. Видно, что расчетный метод обеспечивает хорошую точность.

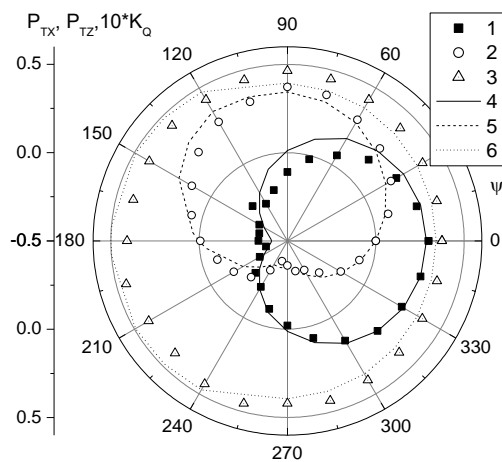


Рис. 8. Сопоставление расчетных и экспериментальных величин сил и момента на ГВ в зависимости от угла поворота движителя ψ ($J=0.2$) [8]. Эксперимент: 1 – P_{TX} ; 2 – P_{TY} ; 3 – K_Q ; расчет: 4 – P_{TX} ; 5 – P_{TY} ; 6 – K_Q

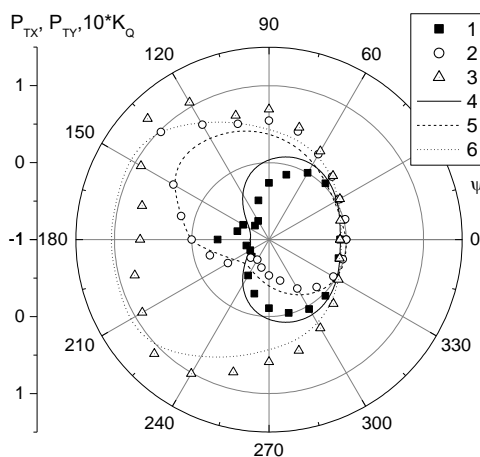


Рис. 9. Сопоставление расчетных и экспериментальных величин сил и момента на ГВ в зависимости от угла поворота движителя ψ ($J=1.0$) [8]. Эксперимент: 1 – P_{TX} ; 2 – P_{TY} ; 3 – K_Q ; расчет: 4 – P_{TX} ; 5 – P_{TY} ; 6 – K_Q

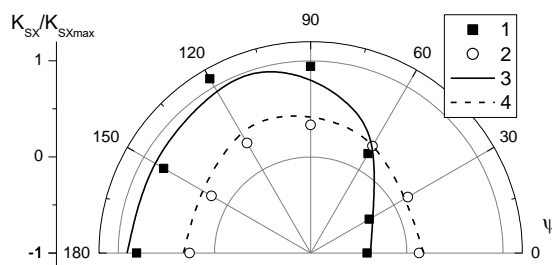


Рис. 10. Сопоставление расчетной и экспериментальной величин продольной сил на движителе при различных поступях. Величины обезразмерены по наибольшему значению. Расчет: 1 – $J=1,3$; 2 – $J=0,5$; эксперимент: 3 – $J=1,3$; 4 – $J=0,5$

Для анализа характеристик движителей МР при углах скоса потока был так же использован метод [8]. Расчеты проводились для движителя с ГВ $D=0,2$ м, мощностью 500 Вт. На рис. 11, 12 представлены зависимости продольной и поперечной сил на движителе от угла его поворота при двух поступях, соответствующих скорости 5 и 1,5 м/с.

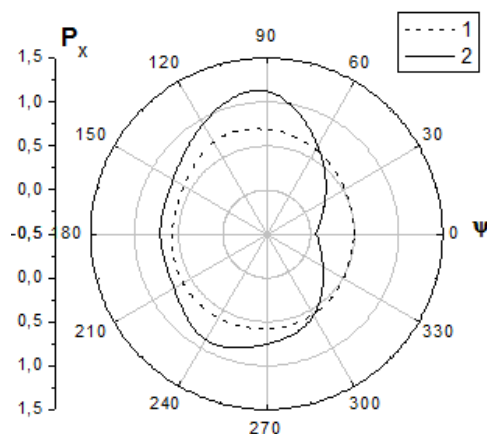


Рис. 11. Зависимость продольной силы на движителе ДМРЛ ($P=500$ Вт, $D=0,2$ м) от угла скоса потока: 1 – $V=1,5$ м/с; 2 – $V=5,0$ м/с

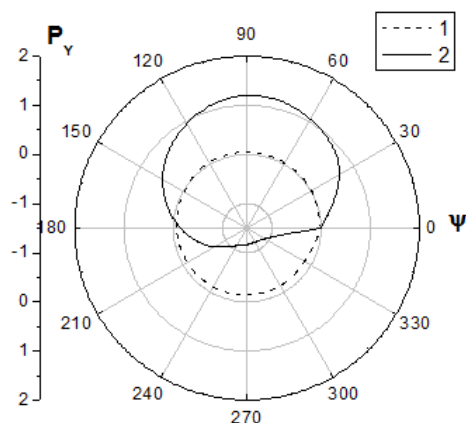


Рис. 12. Зависимость поперечной силы на движителе ДМРЛ ($P=500$ Вт, $D=0,2$ м) от угла скоса потока: 1 – $V=1,5$ м/с; 2 – $V=5,0$ м/с

Первое на что в этих результатах следует обратить внимание – это относительно слабая зависимость сил на движителе от угла скоса потока при малых скоростях потока. Результат вполне объясним, поскольку при малой скорости набегающего потока преобладающий вклад в поле скорости в диске ГВ вносят скорости, вызванные за счет работы самого движителя.

При скорости 5 м/с наблюдается существенная зависимость сил на движителе от угла скоса потока. Продольная сила резко возрастает при натекании потока поперек оси ГВ. В этом случае режим работы ГВ близок к швартовному, на котором ГВ обычно показывает максимальные безразмерные характеристики. Вполне естественно, что поперечная сила на движителе при его обтекании со скосом

порядка 90 градусов достигает наибольших значений, поскольку она определяется сопротивлением гондолы и стойки, на которой крепится движитель. Причем эти значения имеют разный знак в зависимости от угла скоса. Следует иметь в виду, что большим значениям упора движителя при поперечном обтекании соответствует и очень большие значения момента, так что КПД на этих режимах будет крайне низким.

2.2. Анализ работы системы двигатель – движитель. Приведенные выше характеристики относятся непосредственно к возможностям движителя. Однако эти возможности определяются той мощностью, которая может быть развита двигателем.

Известно, что мощность двигателя зависит от его оборотов. В общем случае эта зависимость может иметь сложный характер. Но во многих случаях для нее характерно наличие двух участков: 1) диапазон оборотов, при которых мощность сохраняется неизменной; 2) область постоянного момента на валу двигателя. Эти два случая и будут рассмотрены более подробно. В случае сохранения постоянной мощности (этот режим обычно имеет место для диапазона оборотов вблизи номинальных), переход движителя на режимы работы отличные от проектного сопровождается изменением коэффициента момента. В случае появления скоса потока или уменьшения поступи коэффициент момента растет. Следовательно, обороты должны падать по следующему закону

$$n = \sqrt[3]{\frac{N}{2\pi\rho D^5 K_Q(J, \psi)}} \quad (6)$$

Подставляя эти обороты в выражения для упора (1), можно определить величину упора, которую сможет развить система двигатель-движитель.

Пример расчета упора, создаваемого движителем ДМРЛ ($P=500$ Вт, $D=0,2$ м), при сохранении постоянной мощности двигателя представлен на рис. 13. Видно, что по сравнению с безразмерными характеристиками движителя (рис. 11) эпюра существенно выравнялась. Это связано с тем, что на наиболее нагруженных режимах (при поперечном набегании потока на движитель) двигатель не справляется с нагрузкой, как следствие, падают обороты ГВ и создаваемый движителем упор.

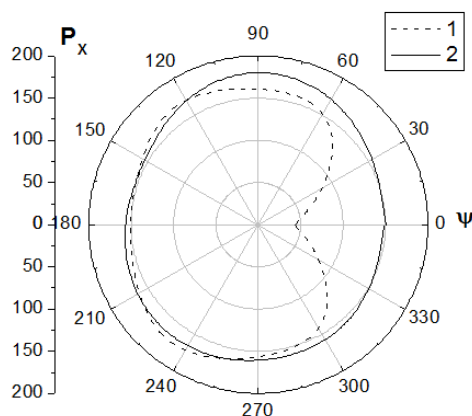


Рис. 13. Упор при мощности не зависящей от оборотов: 1 – $V=1,5$ м/с; 2 – $V=5,0$ м/с

В случае сохранения постоянства момента на валу при изменении оборотов, падение оборотов происходит более интенсивно

$$n = \sqrt{\frac{N}{2\pi\rho D^5 K_Q(J, \psi) \cdot n_{\text{ном}}}}, \quad (7)$$

где $n_{\text{ном}}$ – номинальные обороты ГВ на проектном режиме.

Расчет в этом случае показал еще большее выравнивание упора на всех углах скоса потока и при изменении скорости этого потока. При этом произошло существенное (от 1,5 до 2 раз) общее снижение упора создаваемого двигателем.

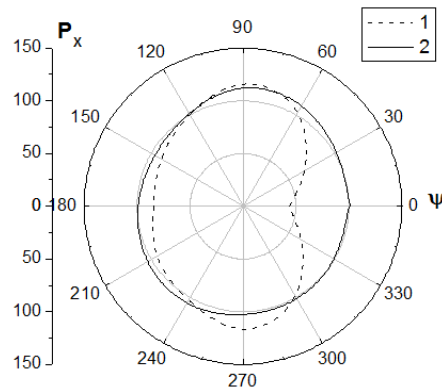


Рис. 14. Упор при сохранении постоянного момента: 1 – $V=1,5$ м/с; 2 – $V=5,0$ м/с

Следует иметь в виду, что, как уже отмечалось, помимо снижения упора и КПД двигателя, на непроектных режимах существенно меняются обороты ГВ. Для каждого двигателя существуют ограничительные характеристики по оборотам, за пределами которых он либо перестает работать, либо работа связана с большими рисками. В результате ряд режимов работы двигателя может оказаться неприемлемыми по причине выхода за ограничительные характеристики. Расчетная оценка позволяет оценить область таких режимов и опасность их возникновения при маневрировании.

Заключение. Подводя итог, можно сделать следующие выводы:

- ◆ При разработке МР необходимо учитывать специфику двигателей, заключающуюся в том, что двигатель имеет наилучшие характеристики только на одном (так называемом проектном) режиме работы. Оптимизация двигателя осуществляется именно на данный режим. В настоящее время созданы методы численной оптимизации, позволяющие оптимизировать двигатель на заданный диапазон режимов работы, но это обычно приводит к некоторому снижению его характеристик.

- ◆ С учетом специфики работы двигателей МР целесообразно разрабатывать нескольких типов двигателей, применяемых в зависимости от требований к управлению МР. Причем для МР можно разработать типоряды таких двигателей различной мощности и габаритов. При этом геометрия всех элементов каждого из двигателей этого типоряда оказывается уникальной и не может быть получена простым масштабированием.

- ◆ При реализации алгоритмов управления МР необходимо иметь в виду, что упор, создаваемый двигателем, нелинейно зависит от целого ряда параметров. К числу наиболее важных параметров относятся частота вращения вала, скорость

MP, угол натекания потока, а также характеристики работы двигателя. Зависимость характеристик движителя от вышеперечисленных и ряда других параметров может быть определена в ходе модельных испытаний или на основе разработанных в Крыловском ГНЦ математических моделей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дмитриев А.Н.* Проектирование подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1978. – 235 с.
2. *Боженев Ю.А., Борков А.П., Гаврилов В.И. и др.,* Самоходные обитаемые подводные аппараты / под общей ред. И.Б. Иконникова – Л.: Судостроение, 1986. – 254 с.
3. *Яковлев А.Ю., Маринич Н.В., Шевцов С.П.* Направления и способы гидродинамического совершенствования движительных комплексов подводных аппаратов и роботов // Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции "Современные методы и средства океанологических исследований" (МСОИ-2017). Москва 16-18 мая 2017 г. – С. 202-205.
4. *Борусевич В.О., Яковлев А.Ю.* Перспективы применения опыта проектирования судовых движителей для задач морской робототехники // International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2017, October 9-11 – Saint-Petersburg – Russia.
5. *Бочаров Л.Ю.* Характеристика зарубежных технологий создания кольцевых электродвигателей-движителей для обитаемых подводных аппаратов и кораблей // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 86-90.
6. *Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А.* Судовые движители. – Л.: Судостроение, 1988. – 245 с.
7. *Alexey Yu. Yakovlev, Anna G. Lobova, Nikolay Vl. Marinich,* The Method of flowing surface optimization based on BEM calculation and its practical application // 10th International Conference on Hydrodynamics ICHD'2012, St. Petersburg – Russia. – October 1-4 2012. – P. 25-32.
8. *Yakovlev A.Yu.,* Calculation of propulsion pod characteristics in off-design operating conditions // Proceedings of the First international symposium on marine propulsors. SMP'09, Royal Garden Hotel – Trondheim – Norway - 22–24 June 2009.
9. *Palmer A., Hearn G.E., Stevenson P.* Experimental Testing of an Autonomous Underwater Vehicle with Tunnel Thrusters // Proceedings of the First International Symposium on Marine Propulsors SMP'09, Trondheim – Norway - June 2009.
10. *Афремов А.Ш., Мартиросов Г.Г., Немзер А.И., Русецкий А.А., Сергеев В.В., Шевцов С.П., Яковлев А.Ю.* Средства активного управления судами: монография / под общ. ред. д.т.н., проф. А.А. Русецкого. – СПб.: ФГУП "Крыловский государственный научный центр", 2016. – 182 с.
11. *Шевцов С.П.* Исследование гидродинамических характеристик подруливающего устройства типа «винт в трубе». Уточнение методики проектирования этих устройств, включая установки большой мощности: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб., 2014.
12. *Брусиловский И.В.* Аэродинамический расчет осевых компрессоров. – М.: Машиностроение, 1986. – 288 с.
13. *Яковлев А.Ю., Соколов М.А., Маринич Н.В.* Численное проектирование и экспериментальная проверка подруливающего устройства с кольцевым приводом // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2013. – Т. 73 (357). – С. 17-32.
14. *Бушковский В.А., Яковлев А.Ю., Маринич Н.В.* Водометный двигатель-движительный комплекс. Патент на изобретение №2585207. Приоритет от 22.12.14. Дата регистрации 29.04.16.
15. Справочник по теории корабля / под ред. Я.И. Войткунского. В 3 т. – Л.: Судостроение, 1985.
16. *Левковский Ю.Л.* Шум гребных винтов. – СПб.: ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова», 2005.
17. *Borusevich V.O., Pustoshny A.V., Bushkovsky V.A., Yakovlev A.Yu.* Capabilities of analytical/experimental investigations and prediction of propeller acoustic performance // Proceedings NSN'2015, July 2 - 3 2015 - St.-Petersburg – Russia. – P. 65-74.
18. *Moukhin A.B., Borusevich V.O., Yakovlev A.Yu.* Design of high-skew (asymmetric) propellers // Proceedings of NSN'2017, St.-Petersburg - 29-30 June 2017.

19. Яковлев А.Ю., Колосова Е.А., Софьина Л.Ю. Численное исследование гидродинамических характеристик движителей, обусловленных маневрированием судна в условиях воздействия природных факторов // International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering NAOE 2016, С.-Петербург 6-8 июня 2016 г.
20. Вельтищев В.В., Анализ влияния скошенного потока на рабочие характеристики движителей необитаемых подводных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2010. – С. 97-106.
21. Полтавец П.А., Капранцев С.В., Чичерин И.А., Андреев В.А., Результаты испытаний макета винто-рулевой колонки при различных углах ее поворота // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2015. – Т. 90 (374). – С. 103-108.

REFERENCES

1. Dmitriev A.N. Proektirovanie podvodnykh apparatov [Design of underwater vehicles]. Leningrad: Sudostroenie, 1978, 235 p.
2. Bozhenov Yu.A., Borkov A.P., Gavrilov V.I. i dr. Samokhodnye neobitaemye podvodnye apparaty [self-propelled uninhabited underwater vehicles], ed. by I.B. Ikonnikova. Leningrad: Sudostroenie, 1986, 254 p.
3. Yakovlev A.Yu., Marinich N.V., Shevtsov S.P. Napravleniya i sposoby gidrodinamicheskogo sovershenstvovaniya dvizhiteley i robotov [Directions and methods of hydrodynamic improvement of propulsion systems of underwater vehicles and robots], *Materialy XV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy" (MSOI-2017). Moskva 16-18 maya 2017 g.* [Proceedings of MSOI-2017, Moscow - 16-18 may 2017], pp. 202-205.
4. Borusevich V.O., Yakovlev A.Yu. Perspektivy primeneniya opyta proektirovaniya sudovykh dvizhiteley dlya zadach morskoy robototekhniki [Experience application prospects of designing marine propellers to the marine robotics tasks], *International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2017, October 9-11 – Saint-Petersburg – Russia.*
5. Bocharov L.Yu. Kharakteristika zarubezhnykh tekhnologiy sozdaniya kol'tsevykh elektrodvigateley-dvizhiteley dlya neobitaemykh podvodnykh apparatov i korablye [A characteristic of foreign technologies, the creation of a ring motors-propulsion for unmanned underwater vehicles and ships], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied hydrophysics], 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 86-90.
6. Artyushkov L.S., Achkinadze A.Sh., Rusetskiy A.A. Sudovye dvizhiteli [Ship propulsors]. Leningrad: Sudostroenie, 1988, 245 p.
7. Alexey Yu. Yakovlev, Anna G. Lobova, Nikolay Vl. Marinich, The Method of flowing surface optimization based on BEM calculation and its practical application, *10th International Conference on Hydrodynamics ICHD'2012, St. Petersburg – Russia. October 1-4 2012*, pp. 25-32.
8. Yakovlev A.Yu., Calculation of propulsion pod characteristics in off-design operating conditions, *Proceedings of the First international symposium on marine propulsors. SMP'09, Royal Garden Hotel – Trondheim – Norway - 22–24 June 2009.*
9. Palmer A., Hearn G.E., Stevenson P. Experimental Testing of an Autonomous Underwater Vehicle with Tunnel Thrusters, *Proceedings of the First International Symposium on Marine Propulsors SMP'09, Trondheim – Norway - June 2009.*
10. Afremov A.Sh., Martirosov G.G., Nemzer A.I., Rusetskiy A.A., Sergeev V.V., Shevtsov S.P., Yakovlev A.Yu. Sredstva aktivnogo upravleniya sudami: monografiya [Azimuth thrusters], superv. ed A.A. Rusetskogo. Saint Petersburg: FGUP "Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr", 2016, 182 p.
11. Shevtsov S.P. Issledovanie gidrodinamicheskikh kharakteristik podruvivayushchego ustroystva tipa «vint v trube». Utochnenie metodiki proektirovaniya etikh ustroystv, vklyuchaya ustanovki bol'shoi moshchnosti: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of hydrodynamic characteristics of the thruster type "screw in the pipe". Clarification of the design methods of these devices, including high-power plants. autoabstract cand. of eng. sc. diss.]. Saint Petersburg, 2014.
12. Brusilovskiy I.V. Aerodinamicheskii raschet osevykh kompressorov [Aerodynamic calculation of axial compressors]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 288 p.

13. *Yakovlev A.Yu., Sokolov M.A., Marinich N.V.* Chislennoe proektirovanie i eksperimental'naya proverka podrulivayushchego ustroystva s kol'tsevyim privodom [Numerical design and experimental verification of bow-thruster with rim-driver], *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [KSRC Transactions], 2013, Vol. 73 (357), pp. 17-32.
14. *Bushkovskiy V.A., Yakovlev A.Yu., Marinich N.V.* Vodometnyy dvigatel'no-dvizhitel'nyy kompleks. Patent na izobrenenie №2585207. Prioritet ot 22.12.14. Data registratsii 29.04.16 [Water-jet propulsion system. Patent of Russian Federation №2585207. Priority 22.12.14. Registration date 29.04.16].
15. *Spravochnik po teorii korablya* [Handbook on ship theory], ed. by Ya.I. Voytkunskogo. In 3 vol. Leningrad: Sudostroenie, 1985.
16. *Levkovskiy Yu.L.* Shum grebnykh vintov [Noise of marine propellers]. Saint Petersburg: FGUP «TsNII im. akad. A.N. Krylova», 2005.
17. *Borusevich V.O., Pustoshny A.V., Bushkovskiy V.A., Yakovlev A.Yu.* Capabilities of analytical/experimental investigations and prediction of propeller acoustic performance, *Proceedings NSN'2015, July 2 - 3 2015 - St.-Petersburg – Russia*, pp. 65-74.
18. *Moukhin A.B., Borusevich V.O., Yakovlev A.Yu.* Design of high-skew (asymmetric) propellers, *Proceedings of NSN'2017, St.-Petersburg - 29-30 June 2017*.
19. *Yakovlev A.Yu., Kolosova E.A., Sofina L.Yu.* Chislennoe issledovanie gidrodinamicheskikh kharakteristik dvizhiteley, obuslovlennykh manevrirovaniem sudna v usloviyakh vozdeystviya prirodnykh faktorov [Numerical investigation of the hydrodynamic characteristics of the propeller caused by the vessel is maneuvering in the conditions of influence of natural factors], *International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering NAOE 2016*, Saint Petersburg 6-8 June 2016 year.
20. *Vel'tishchev V.V.* Analiz vliyaniya skoshennogo potoka na rabochie kharakteristiki dvizhiteley neobitaemykh podvodnykh apparatov [Analysis of the effect of the inclined flow on the performance of uninhabited underwater vehicles propellers], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Mashinostroenie»* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering], 2010, pp. 97-106.
21. *Poltavets P.A., Kaprantsev S.V., Chicherin I.A., Andreev V.A.* Rezul'taty ispytaniy maketa vinto-rulevoy kolonki pri razlichnykh uglakh ee povorota [The model test results of the podded propulsor at various angles of its rotation], *Trudy Krylovskogo go-sudarstvennogo nauchnogo tsentra* [KSRC Transactions], 2015, Vol. 90 (374), pp. 103-108.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Л.И. Вишнеvский.

Борусевич Валерий Олегович – Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр»; e-mail: 10_otd@ksrc.ru; 196158, С.-Петербург, Московское шоссе, 44; тел.: 88124154941; к.т.н.; начальник отделения ходкости кораблей и судов.

Яковлев Алексей Юрьевич – тел.: 88123866735; д.т.н.; доцент; зам. начальника отделения ходкости кораблей и судов – начальник отдела управления проектами.

Borusevich Valery Olegovich – Krylov State Research Centre; e-mail: 10_otd@ksrc.ru; 44, Moskovskoye shosse, St. Petersburg, 196158, Russia; phone: +78124154941; cand. of eng. sc.; head of Ship Propulsion Division.

Yakovlev Aleksey Olegovich – phone: +78123866735; dr. of eng. sc.; associate professor; deputy head of Ship Propulsion Division – Head of Project Management Department.